

EVALUASI PERPINDAHAN MASSA FENOL PADA KOLOM TERISI ZEOLIT AKTIF

I Made Bendiya^{*} dan Andry Hendratmoko^{**}

ABSTRACT

Adoption of dilute phenol solution in a fixed bed column contained zeolite has been performed. The main objective of the work was to evaluate parameters that came up in a mathematical model. The parameters that would be evaluated were volumetric mass transfer coefficient, K_{ca} , dispersion coefficient, D_L , effective diffusivity of phenol in the zeolite, D_e , and equilibrium constant, H .

Phenol solution of 10 ppm was poured into a phenol storage tank. The fixed bed column was filled up with aquadest in order to saturate zeolite in the bed. To study the effect of Reynolds number, phenol solution was flowed into the column with the linear velocities between 0.0675 and 0.1688 cm/sec. The particle diameter studied were between 0.1001 and 0.4013 cm. Every 10 minutes interval, effluent from column was sampled and analyzed its phenol content.

Evaluation of experimental data shows that the average values of H is 6×10^{-2} mL/g zeolite. Effective diffusivity phenol in zeolite are between $0.10 \times 10^{-9} - 111 \times 10^{-9}$ cm²/sec. The relationship between Sherwood number and other factors in terms of dimensionless groups is :

$$\left(\frac{Sh}{Sc^{1/3}} \right) = 5.2178 Re^{0.4028} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{-0.8385} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0.8057}$$

which gives an average error of 0.78% and holds for Re between 1.3 and 5.2; (Z/D_p) between 74.8 and 299.7; (D_z/D_p) between 8.721 and 34.965. Dispersion coefficient in terms of dimensionless groups can be expressed as follows:

$$\left(\frac{D_L/D_{AB}}{Sc^{1/3}} \right) = 2.0798 Re^{0.9784} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{1.1146} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0.0819}$$

which gives an average error of 3.80% and holds for Re between 1.3 and 5.2; (Z/D_p) between 74.8 and 299.7; (D_z/D_p) between 8.721 and 34.965.

^{*} Dosen Jurusan Teknik Kimia, FT- UGM

^{**} Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, FT- UGM

1. PENDAHULUAN

Limbah cair yang berasal dari suatu industri atau kawasan industri biasanya mengandung senyawa anorganik dan/atau senyawa organik. Proses penghilangan senyawa anorganik tergantung pada jenis senyawa anorganiknya, sedangkan senyawa-senyawa organik di dalam air limbah cair biasanya dihilangkan dengan cara diadsorpsi dengan karbon aktif (Cooney and Xi, 1994). Air limbah yang berasal dari beberapa industri dan industri petrokimia mengandung beberapa senyawa organik konsentrasi rendah. Problema senyawa organik yang terkait dengan lingkungan adalah keberadaannya di dalam air limbah dengan konsentrasi yang sangat rendah. Sebagian besar senyawa organik menyebabkan gangguan terhadap kesehatan dan lingkungan, sehingga dalam keadaan tertentu perlu dihilangkan (Lin dan Hsu, 1995). Kelompok senyawa fenol merupakan salah kelompok polutan yang sangat toksik. Toksisitas senyawa ini terutama ditentukan oleh konsentrasi dan struktur kimianya. Senyawa khlorofenol telah ditemukan di dalam air limbah pabrik pulp di Kanada (Xie et al., 1986) dan juga di dalam air tanah (Lampi et al., 1990). Di Taiwan karena pertumbuhan industri sangat cepat, kontaminasi tanah dan air tanah oleh khlorofenol telah dilaporkan oleh Chang (1994). Konsentrasi khlorofenol di daerah Hou - Jin, nilainya berkisar antara tidak terdeteksi sampai dengan 0,53 mg/L di dalam air sungai dan antara tidak terdeteksi sampai dengan 25,02 mg/kg di dalam sedimen yang terdapat di dalam sungai. Apabila senyawa ini atau polutan secara umum masuk ke lingkungan akan mengalami berbagai proses baik fisik, biologi maupun kimia yang dapat terjadi secara simultan (Brusseau dan Rao, 1989). Fenol yang ada di dalam tanah akan berubah dan perubahannya tergantung pada waktu, tipe senyawa fenol dan kualitas mikroorganisme yang ada di tanah (Dolgova dan Kuchma, 1981). Dolgova dan Kuchma menyatakan bahwa tanah mempunyai kemampuan untuk menyerap fenol dalam bentuk aerosol. Kemampuan tanah untuk menyerap fenol sangat besar karena gugus (OH) pada fenol bereaksi dengan bahan organik yang ada di tanah.

Usaha-usaha untuk mengurangi konsentrasi senyawa fenol agar tidak mencemari lingkungan telah dilakukan dengan berbagai pendekatan, misalnya ekstraksi, oksidasi kimia, adsorpsi, reaksi enzimatis, dan proses biologi. Pada umumnya proses biologi mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan proses lain, misalnya hemat energi dan tidak memerlukan proses lanjutan.

Senyawa fenol pada umumnya dapat teradsorpsi oleh adsorben alam, misalnya sedimen dalam sungai, (Jacobsen et.al, 1996), dan dapat terdekomposisi karena reaksi kimia dan/atau biologi (Jacobsen and Arvin, 1996, Fang et.al., 1996). Proses-proses ini akan terjadi secara simultan dan saling mempengaruhi. Kondisi alam yang tidak menentu menimbulkan keadaan yang lebih kompleks.

Penelitian adsorpsi senyawa-senyawa organik telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti (Giusti dkk, 1974; McKay and Bino, 1990; Ying and Woehr, 1990; Heilshorn, 1991; Noll dkk, 1992; Stenzel, 1993; Graham and Ramaratnam, 1993; Chatzopoulos dkk, 1994; Sorial dkk, 1994). Adsorpsi zat-zat organik fase cair dengan menggunakan karbon aktif bentuk granular (GAC) maupun karbon aktif fibers (ACFs) sedang banyak diteliti oleh para ahli. Aseton, isopropil alkohol (IPA), fenol, dan tetrahidrofuran (THF) adalah zat-zat yang dijadikan sebagai model dalam penelitian-penelitian tersebut.

Adsorpsi terbagi menjadi dua tipe (Treybal, 1981), yaitu adsorpsi fisis dan kimia. Adsorpsi pada suatu padatan melalui beberapa tingkatan (Noll et al., 1992):

- Diffusi eksternal (*external diffusion*). Perpindahan massa karena difusi molekuler solut (*adsorbate*) dari *bulk fluid phase* melalui suatu lapisan tipis (film) yang mengelilingi padatan menuju kepermukaan padatan (*adsorbent*).
- Diffusi internal (*internal diffusion*). Perpindahan massa solut ke dalam partikel padatan dengan cara migrasi molekul solut dari permukaan padatan bagian luar ke dalam permukaan pori - pori dan / atau dengan cara difusi molekuler molekul solut melalui pori partikel.
- Proses adsorpsi (*sorption process*). Molekul pada pori-pori teradsorpsi dari larutan ke permukaan padatan. Proses ini biasanya relatif cepat dibandingkan dengan dua langkah proses sebelumnya. Oleh karena itu dianggap terjadi keseimbangan lokal antara padatan dan solutnya.

Pada proses adsorpsi larutan encer, adsorpsi suatu solut pada keadaan isothermal sering dinyatakan dengan persamaan empiris Freundlich, Langmuir dan Redlich-Peterson (Al-Duri dan McKay, 1990).

Schweitzer (1979) menyatakan bahwa adsorpsi dengan karbon aktif merupakan unit proses penting yang banyak digunakan untuk menghilangkan material-material yang tidak diinginkan dari suatu larutan. Metode ini merupakan metode pemisahan material yang paling ekonomis dengan syarat konsentrasi senyawa yang diserap sangat rendah.

Pada penelitian ini akan dievaluasi parameter-parameter yang muncul pada model matematik yang tersusun berdasarkan anggapan-anggapan berikut ini: (a). proses *isothermal*, (b). perpindahan massa hanya terjadi dari fase cair ke fase padat, (c). aliran fluida melalui padatan mengikuti aliran sumbat (*plug-flow*), (d). ukuran butir padatan sama dan tetap dan berbentuk bola, (e). butir padatan terdistribusi merata di dalam kolom, (f). ada gradien konsentrasi di dalam butir padatan.

2. LANDASAN TEORI

Berdasarkan asumsi yang telah diuraikan pada pendahuluan, maka akan disusun neraca massa fenol pada fase cair dan padat.

Neraca massa A (fenol) pada cairan di dalam elemen volume, dapat dinyatakan dengan persamaan diferensial sebagai berikut :

$$D_L \cdot \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} - u_L \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} - K_{Ca} (C_A - C_A^*) = \epsilon \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (1),$$

dengan keadaan awal dan batas berturut - turut :

$$C_A(z, 0) = 0 \quad (2),$$

dan

$$C_A(0, t) = C_{Ain} \quad (3),$$

$$C_A(L, t) = C_{Aout} \quad (4),$$

Sedangkan neraca massa A (fenol) pada butir padatan dapat ditulis seperti terlihat pada persamaan (2)

$$\frac{\partial^2 C_{AS}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_{AS}}{\partial r} = \frac{1}{D_e} \cdot \frac{\partial C_{AS}}{\partial t} \quad (5),$$

dengan keadaan awal dan batas berturut – turut :

$$C_{AS}(r, 0) = 0 \quad (6),$$

dan

$$C_{AS}(0, t) = \text{tertentu} \text{ atau } \frac{\partial C_{AS}}{\partial r} = 0 \quad (7),$$

$$\left. \frac{\partial C_{AS}}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{R}{3\rho D_e} K_{Ca}(C_A - C_A^*) \quad (8).$$

Persamaan kesetimbangan antara cairan-padatan dianggap mengikuti tipe hukum Henry :

$$C_A^* = H \cdot C_{AS} \quad (9)$$

Persamaan (1), dengan kondisi batas persamaan (2), (3), dan (4) dan persamaan(5) dengan kondisi batas persamaan (6), (7), dan (8) diselesaikan dengan cara numerik (Gerald dan Wheatley, 1984) dan optimasi peubah jamak (*multivariable optimization*) dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter yang muncul pada model. Metode optimasi peubah jamak yang dipakai adalah metode Hooke – Jeeves (Rudd dan Watson, 1968) Parameter-parameter K_{Ca} , D_L , D_e , dan H dievaluasi secara simultan. Nilai yang dicari adalah bila jumlah selisih kuadrat antara C_A hasil simulasi dengan C_A percobaan nilainya minimum (SSE minimum)

Hubungan antara koefisien transfer massa (K_{Ca}) dan dispersi aksial (D_L) dengan peubah-peubah yang mempengaruhinya dalam bentuk kelompok tidak berdimensi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\left(\frac{K_{Ca} \rho D_p^2}{\mu} \right) = a_0 \left(\frac{u_L \rho D_p}{\mu} \right)^{a_1} \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{a_2} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{a_3} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{a_4} \quad (10),$$

atau dapat ditulis menjadi,

$$Sh = a_0 Re^{a_1} Sc^{a_2} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{a_3} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{a_4} \quad (11),$$

dan

$$\frac{D_L}{D_{AB}} = c_0 \left(\frac{u_L \cdot \rho \cdot D_p}{\mu} \right)^{c_1} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \right)^{c_2} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{c_3} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{c_4} \quad (12),$$

atau :

$$\frac{D_L}{D_{AB}} = c_0 (Re)^{c_1} (Sc)^{c_2} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{c_3} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{c_4} \quad (13).$$

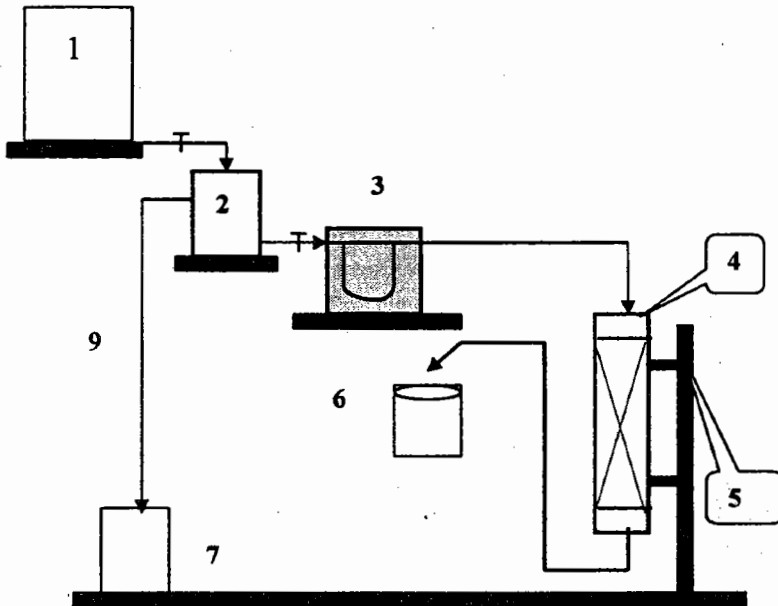
Nilai tetapan-tetapan $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, c_0, c_1, c_2, c_3$ dan c_4 dievaluasi berdasarkan data percobaan dengan metode regresi multi dimensi (Edwards, 1985)

3. PELAKSANAAN PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah : fenol (kemurnian 99,5 %, diperoleh dari Laboratorium Proses Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM), zeolit aktif (dari Perusahaan Purosani, Jln. Wates km 7, Yogyakarta), dengan komposisi kimia : $SiO_2 = 73,09\%$; $Al_2O_3 = 11,17\%$; $K_2O = 6,13\%$; $Fe_2O_3 = 1,25\%$; $CaO = 0,9\%$; $Na_2O = 0,39\%$; $P_2O_5 = 0,02\%$; $MnO = 0,02\%$; $MgO = 0,18\%$, kapasitas tukar kationnya = 68,3 (meq/100 g), dan daya serap terhadap *methylene blue* = 6 (meq/100g). Adapun rangkaian alat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.

Sebelum percobaan untuk pengambilan data dikerjakan, dibuat dua grafik standar yaitu grafik yang menunjukkan hubungan beda tinggi air raksa (Δh) pada manometer dengan debit (Q) dan hubungan antara absorbansi dengan konsentrasi fenol di dalam air. Disamping itu juga dilakukan pecucian zeolit dengan air untuk menghilangkan debu debu yang tidak diinginkan dan penjenruhan zeolit yang sudah dimasukkan ke dalam kolom dengan akuades.

Larutan fenol dengan konsentrasi tertentu dimasukkan pada tangki 1. Selanjutnya larutan fenol dengan kecepatan tertentu dialirkan ke dalam kolom dan setiap interval waktu tertentu diambil cuplikannya pada tempat yang sudah disediakan. Kemudian cuplikan diukur absorbansinya pada spektrofotometer untuk mengetahui kadar fenolnya. Peubah yang dipelajari adalah kecepatan alir fenol dan diameter zeolit.



Keterangan gambar :

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Tangki umpan larutan fenol | 6. Tempat pengambilan sampel |
| 2. Tangki <i>over-flow</i> | 7. Tangki penampung sementara |
| 3. Flowmeter (manometer dan Orifice) | 8. Kran pengatur debit aliran |
| 4. Kolom kaca | 9. Selang plastik |
| 5. Statif dan klem | |

Gambar 1. Rangkaian alat penelitian

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian berturut-turut terlihat pada daftar I dan II dan gambar 2 dan 3. Pada gambar 2 terlihat bahwa hanya lima konsentrasi hasil penelitian dan simulasi yang digambarkan dari enam data yang tertera pada daftar I. Terlihat bahwa makin lama waktu proses makin tinggi konsentrasi fenol yang keluar kolom terisi zeolit. Ini berarti bahwa zeolit yang dipakai makin lama kemampuan penjerapannya makin berkurang karena permukaannya telah jenuh dengan fenol. Pada waktu sekitar sepuluh menit pertama kecepatan pengurangan fenol didalam larutan cukup cepat karena pada awal proses adsorpsi semua permukaan zeolit aktif tersedia untuk adsorpsi.

Daftar I. Hubungan antara konsentrasi fenol dalam fluida (C_A) di $z = L$ dengan waktu pada variasi kecepatan aliran fluida (u_L).

($Z=30$ cm, $D_z=3,5$ cm, $D_p=0,2007$ cm, $C_{Ain}=10$ ppm, $C_{A0}=0$, $C_{AS0}=0$)

No	Waktu (menit)	C_A , ppm					
		$u_L=0,0675$ cm/detik	$u_L=0,0722$ cm/detik	$u_L=0,0844$ cm/detik	$u_L=0,1155$ cm/detik	$u_L=0,1471$ cm/detik	$U_L=0,1688$ cm/detik
1.	10	8,2078	8,1725	8,0796	7,8874	7,6335	7,4618
2.	20	8,5148	8,6552	8,4930	8,2380	8,1751	7,9912
3.	30	8,8280	9,2010	8,9065	8,6526	8,3975	8,2086
4.	40	9,1326	9,2243	9,1301	8,8751	8,8110	8,6128
5.	50	9,4189	9,4429	9,4795	9,4481	9,0975	8,8929
6.	60	9,6513	9,6214	9,6077	9,4795	9,2885	9,09796

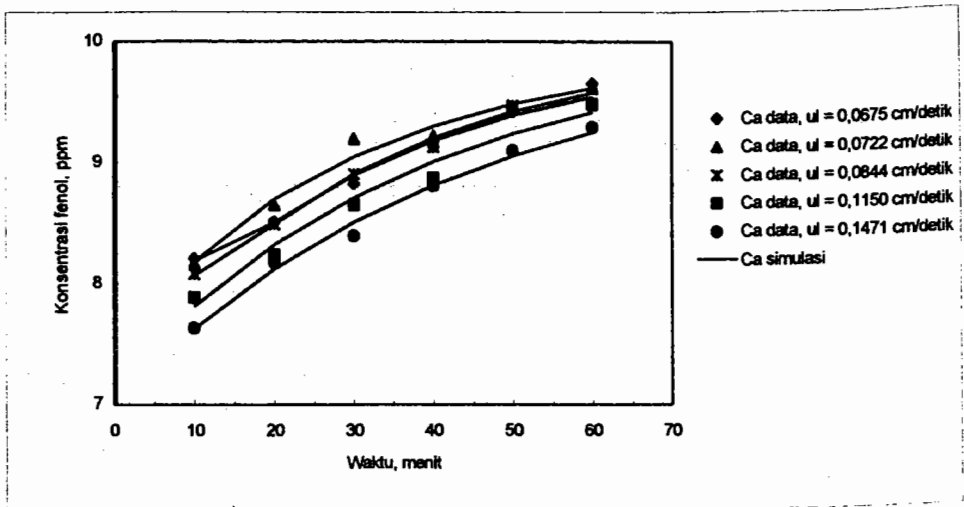
Daftar II. Hubungan antara konsentrasi fenol dalam fluida (C_A) di $z = L$ dengan waktu pada variasi diameter butir padatan (D_p).

($Z=30$ cm, $D_z=3,5$ cm, $u_L=0,1155$ cm/s, $C_{Ain}=10$ ppm, $C_{A0}=0$, $C_{AS0}=0$)

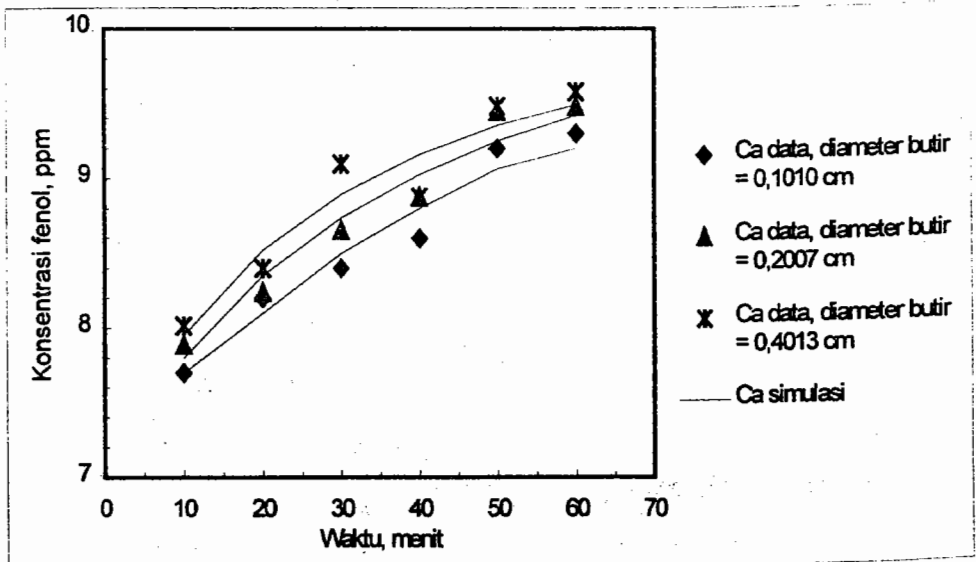
No.	Waktu (menit)	C_A , ppm		
		$D_p=0,1001$ cm	$D_p=0,2007$ cm	$D_p=0,4013$ cm
1.	10	7,7919	7,8874	8,0155
2.	20	8,2065	8,2380	8,3975
3.	30	8,4290	8,6526	8,8751
4.	40	8,6840	8,8751	9,0975
5.	50	9,2885	9,4481	9,4795
6.	60	9,3840	9,4795	9,5750

Terlihat bahwa hasil simulasi cukup dekat dengan hasil percobaan sehingga dapat dikatakan bahwa model matematis yang disusun cukup baik untuk menggambarkan fenomena yang terjadi. Gambar 2 dan 3 menunjukkan bahwa konsentrasi fenol keluar kolom makin lama makin tinggi. Pada proses selanjutnya kecepatan adsorpsi menurun karena konsentrasi fenol di padatan semakin tinggi sehingga gradien konsentrasi antara fluida dengan padatan semakin kecil atau luas permukaan kosong makin kecil. Konsentrasi fenol pada larutan keluar kolom akan sama dengan konsentrasi fenol pada larutan masuk kolom, kalau zeolit yang dipakai sudah jenuh dengan fenol.

Nilai-nilai K_a , D_L , D_e , dan H hasil evaluasi untuk setiap peubah yang dipelajari dapat dilihat pada daftar III dan IV:



Gambar 2. Hubungan antara konsentrasi fenol pada larutan keluar kolom dengan waktu pada berbagai kecepatan linier larutan



Gambar 3. Hubungan antara konsentrasi fenol pada larutan keluar kolom dengan waktu pada berbagai diameter butir

Daftar III. Nilai parameter - parameter pada beberapa variasi kecepatan aliran fluida (u_L)

($Z=30$ cm, $D_z=3.5$ cm, $D_p=0.2007$ cm, $C_{Ain}=10$ ppm, $C_{A0}=0$, $C_{AS0}=0$)

No.	u_L (cm/detik)	$K_c a$ ($\times 10^4$) (detik) ⁻¹	D_L ($\times 10^2$) (cm ² /detik)	De ($\times 10^3$) (cm ² /detik)	H ($\times 10^2$) (mL/g padatan)
1.	0,0675	2,1029	5,5617	5,0702	6,0078
2.	0,0722	2,1076	4,9730	5,1163	6,2033
3.	0,0844	2,2616	6,9000	5,1040	5,9611
4.	0,1155	2,5885	8,7488	3,2000	5,9784
5.	0,1471	2,8156	10,8516	2,9153	5,9772
6.	0,1688	3,0276	12,9664	2,3200	5,9160

Daftar IV. Nilai parameter - parameter pada beberapa variasi diameter butir padatan (D_p)

($Z=30$ cm, $D_z=3.5$ cm, $u_L=0.1155$ cm/s, $C_{Ain}=10$ ppm, $C_{A0}=0$, $C_{AS0}=0$)

No.	D_p (cm)	$K_c a$ ($\times 10^4$) (detik) ⁻¹	D_L ($\times 10^2$) (cm ² /detik)	De ($\times 10^3$) (cm ² /detik)	H ($\times 10^2$) (mL/g padatan)
1.	0,1001	2,4739	9,3896	0,1000	5,8640
2.	0,2007	2,5885	8,7488	3,2000	5,9784
3.	0,4013	2,6406	8,7078	110,7200	6,0380

Daftar III menunjukkan bahwa nilai $K_c a$ makin besar dengan semakin besarnya kecepatan fluida. Hal ini disebabkan dengan semakin cepatnya aliran fluida maka turbulensinya semakin besar atau nilai bilangan Reynolds makin tinggi. Akibatnya lapisan tipis (*film*) yang terbentuk disekitar butir akan menjadi lebih tipis sehingga hambatan perpindahan massa dari fluida ke padatan menjadi kecil. Terlihat dari daftar IV bahwa nilai $K_c a$ juga makin besar dengan semakin besarnya diameter padatan atau semakin besarnya bilangan Reynolds.

Dengan semakin besarnya butir padatan maka gradien konsentrasi dalam padatan juga semakin besar sehingga mempengaruhi kecepatan difusi dari permukaan padatan ke dalam padatan. Difusi efektif di dalam butiran disamping dipengaruhi oleh gradien konsentrasi juga dipengaruhi oleh porositas dan tortuositas didalam padatan. Nilai difusivitas efektif yang diperoleh ternyata masih dalam kisaran harga difusivitas fluida dalam padatan yaitu antara 10^{-10} sampai dengan 10^{-6} cm²/detik (Welty dkk, 1976).

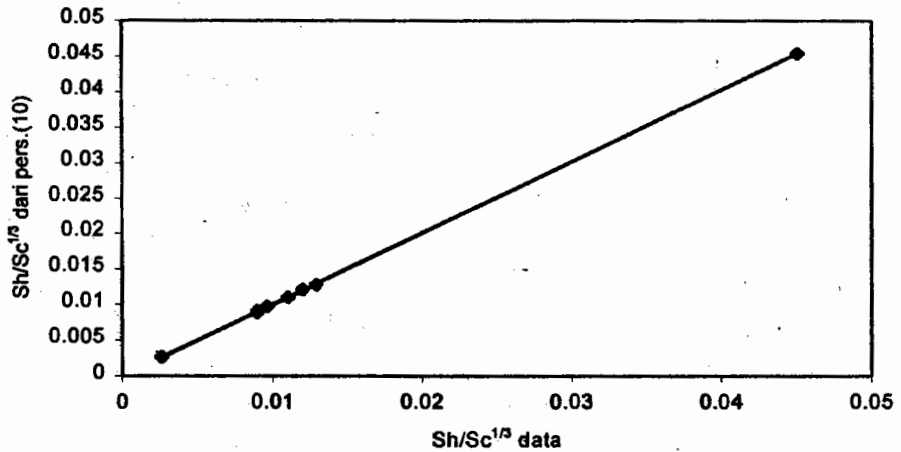
Konstante-konstante yang muncul persamaan (9) atau (10) dievaluasi dengan regresi multi dimensi. Bila diambil nilai $a_2 = 1/3$, hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai $a_0 = 5,2178$; $a_1 = 0.4028$; $a_3 = -0,8385$ dan $a_4 = 0,8057$, sehingga persamaan (9) dan (10) menjadi:

$$\left(\frac{K_{Ca} \rho D_p^2}{\mu} \right) = 5,2178 \left(\frac{u_L \rho D_p}{\mu} \right)^{0,4028} \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{1/3} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{-0,8385} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0,8057} \quad (9)$$

atau dapat ditulis menjadi :

$$\frac{Sh}{Sc^{1/3}} = 5,2178 Re^{0,4028} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{-0,8385} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0,8057} \quad (10)$$

Jika persamaan (9), atau (10) dipakai untuk menghitung kembali $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ dan hasilnya dibandingkan dengan hasil percobaan akan memberikan penyimpangan relatif rata – rata 0,78%. Hubungan antara hasil perhitungan $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ dari persamaan (10) dengan $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ data percobaan dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ persamaan (10) dengan $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ data

Terlihat bahwa nilai $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ hasil percobaan terletak pada satu garis dengan $\frac{Sh}{Sc^{1/3}}$ hasil perhitungan dari persamaan (10).

Hasil penelitian proses adsorpsi dan pertukaran kation pada kolom terisi adsorben (antara lain arang aktif dan bentonit) atau resin didapatkan pangkat bilangan Reynolds yang cukup bervariasi tergantung kisaran bilangan Reynolds yang dipelajari. Daftar V menunjukkan pangkat bilangan Reynolds yang didapat oleh beberapa peneliti sebelumnya dan hasil penelitian ini. Terlihat bahwa makin tinggi bilangan Reynolds pangkat bilangan Reynolds makin kecil. Kisaran bilangan Reynolds cukup besar. Brown (1958) menyatakan bahwa pangkat bilangan Reynolds terletak antara 0,54 – 0,85. Besar kecilnya nilai pangkat bilangan Reynolds tergantung bentuk geometri dan ukuran *packing* (Brown 1958).

Daftar V. Pangkat Bilangan Reynolds (Re) dari Beberapa Hasil Penelitian.

No.	Kisaran Reynolds	Pangkat Re	Peneliti	Kisaran z/D_p	Kisaran D_z/D_p
1.	0,2276 – 0,4451	0,86	Hardiyarto, 1994	133,86	12
2.	0,0135 – 0,0255	0,829	Warsito, 1995	666,31 – 1027,90	31,095 – 51,395
3.	0,0675 – 0,0883	0,48	Mulyaningsih, 1995	117,647 – 147,059	10,588 – 17,647
4.	9,1290 – 32,838	0,1928	Herkamoyo, 1995	213,33 – 320,00	24,000 – 40,000
5.	1,2990 – 5,2080	0,4028	Penelitian ini	74,8 – 299,7	8,721 – 34,965

Dengan prosedur yang sama seperti untuk mengevaluasi konstante-konstante yang muncul pada persamaan (9) atau (10), maka untuk nilai $c_2 = 1/3$ didapat $c_0 = 2,0798$; $c_1 = 0,9784$; $c_3 = 1,1146$ dan $c_4 = 0,0819$, sehingga persamaan (11) menjadi

$$\frac{D_L}{D_{AB}} = 2,0798 \left(\frac{u_L \cdot \rho \cdot D_p}{\mu} \right)^{0,9784} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \right)^{1/3} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{1,1146} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0,0819} \quad (11a)$$

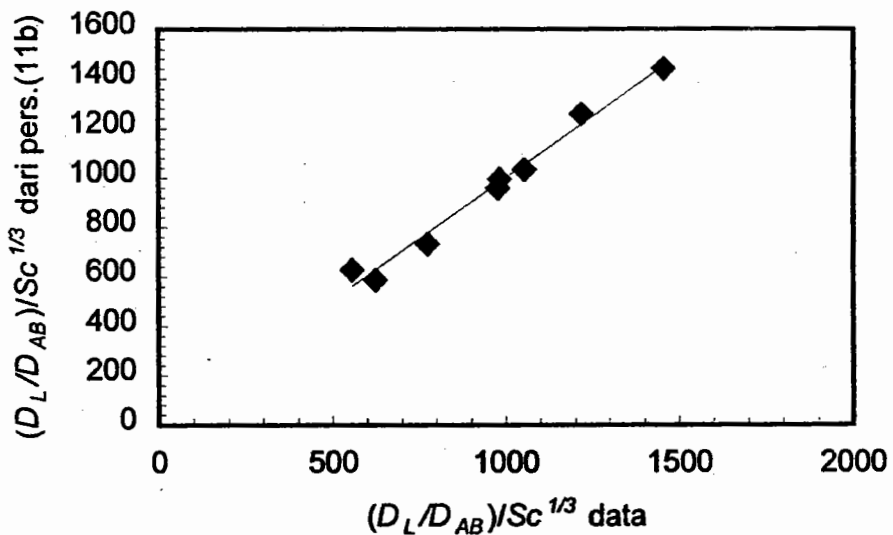
atau dapat ditulis

$$\left(\frac{D_L / D_{AB}}{Sc^{1/3}} \right) = 2,0798 Re^{0,9784} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{1,1146} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0,0819} \quad (11b)$$

Jika persamaan (11a) atau (11b) dipakai untuk menghitung kembali nilai $\left(\frac{D_L / D_{AB}}{Sc^{1/3}} \right)$ dan hasilnya dibandingkan dengan data percobaan memberikan ralat rata-rata relatif sebesar 3,80%. Hubungan antara $(D_L / D_{AB}) / Sc^{1/3}$ hasil perhitungan dengan persamaan (11b) dengan $(D_L / D_{AB}) / Sc^{1/3}$ hasil penelitian terlihat pada gambar 5. Hasil regresi, menunjukkan bahwa nilai tangen arah garis regresi mendekati nilai satu. Ini berarti bahwa nilai $(D_L / D_{AB}) / Sc^{1/3}$ hasil percobaan hampir sama dengan $(D_L / D_{AB}) / Sc^{1/3}$ hasil perhitungan dari persamaan (11b).

Tabel III dan IV berturut-turut menunjukkan bahwa nilai dispersi aksial (D_L) cenderung naik dengan adanya kenaikan kecepatan fluida dan cenderung turun dengan semakin besarnya butir padatan. Manipulasi persamaan (11), didapat bahwa nilai $(D_L/D_{AB})/Sc^{1/3}$ berbanding lurus dengan $(u_L^{0,9784}/D_p^{0,0543})$. Terlihat bahwa pengaruh kecepatan linear jauh lebih besar dari pada pengaruh diameter partikel.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa nilai diffusivitas efektif didalam padatan (D_e) yang semakin kecil dengan adanya kenaikan kecepatan fluida. Peristiwa ini dapat dijelaskan bahwa dengan semakin cepatnya aliran fluida maka kesempatan fenol untuk mendifusi ke dalam padatan persatuan waktu semakin berkurang atau dengan kata lain nilai diffusivitas efektifnya semakin kecil. Dari daftar IV didapatkan nilai D_e yang semakin besar dengan dengan semakin besarnya butir padatan. Jika ukuran butiran cukup kecil maka nilai D_e juga kecil dan untuk ukuran butir yang kecil pendekatan dengan asumsi bahwa konsentrasi solut di dalam butiran merata cukup baik.



Gambar 5. Hubungan antara $(D_L/D_{AB})/Sc^{1/3}$ dari persamaan (11b) dengan $(D_L/D_{AB})/Sc^{1/3}$ data

Nilai tetapan kesetimbangan (H) yang diperoleh dari hasil optimasi komputer cenderung tetap dengan nilai rata-rata 6×10^{-2} mL/gram padatan dan deviasi dari nilai rata-rata sebesar 1,02 %.

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Model matematis yang diajukan dapat mewakili fenomena yang terjadi pada proses adsorpsi fenol dengan baik.
2. Makin tinggi bilangan Reynolds, nilai $K_c a$ dan D_L makin besar.
3. Hubungan antara koefisien transfer massa volumetris ($K_c a$) dengan variabel-variabel yang mempengaruhinya dalam bentuk kelompok tidak berdimensi adalah :

$$\left(\frac{Sh}{Sc^{1/3}} \right) = 5,2178 Re^{0,4028} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{-0,8385} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0,8057}$$

dan memberikan ralat rata-rata sebesar 0,78% dan berlaku untuk Re antara 1,3 dan 5,2; (Z/D_p) antara 74,8 dan 299,7; (D_z/D_p) antara 8,721 dan 34,965.

4. Hubungan antara dispersi aksial (D_L) dengan variabel-variabel yang mempengaruhinya dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\left(\frac{D_L / D_{AB}}{Sc^{1/3}} \right) = 2,0798 Re^{0,9784} \left(\frac{Z}{D_p} \right)^{1,1146} \left(\frac{D_z}{D_p} \right)^{-0,0819}$$

dan memberikan ralat rata-rata 3,80% dan berlaku untuk Re antara 1,3 dan 5,2; (Z/D_p) antara 74,8 dan 299,7; (D_z/D_p) antara 8,721 dan 34,965.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Prof. Ir. Bambang Soehendro, M.Sc., D.E.Sc. atas segala fasilitas yang diberikan dan kepada semua staf Laboratorium Teknologi Kimia Umum sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Disamping itu penulis juga mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuannya sehingga paper ini dapat dipublikasikan.

7. DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

- A = luas permukaan perpindahan massa, cm^2
- BM = berat molekul fenol, g/gmol
- C_A = konsentrasi fenol dalam larutan, g/ cm^3
- C_{Ain} = konsentrasi fenol umpan, g/ cm^3
- C_{A0} = konsentrasi fenol dalam larutan mula-mula, g/ cm^3
- C_{As} = konsentrasi fenol dalam padatan, g/g padatan
- C_{As0} = konsentrasi fenol dalam padatan mula-mula, g/g padatan
- C_A^* = konsentrasi fenol dalam interface fluida padatan yang berkesetimbangan dengan konsentrasi fenol dalam padatan, g/ cm^3

- D_{AB} = diffusivitas molekuler fenol dalam air, cm^2/detik
 D_e = diffusivitas efektif pada padatan, cm^2/detik
 D_L = dispersi aksial pada aliran fluida, cm^2/detik
 D_p = diameter padatan, cm
 D_z = diameter kolom, cm
 H = konstanta keseimbangan, cm^3/g padatan
 K_c = koefisien transfer massa, $\text{cm}^2 \cdot \text{detik}^{-1}$
 K_{ca} = koefisien transfer massa volumetris, detik^{-1}
 N_{AZ} = kecepatan perpindahan massa A arah z, g/detik
 r = jarak dari pusat bola, cm
 R = jari-jari padatan, cm
 Re = bilangan Reynolds, $\frac{u_L \cdot \rho \cdot D_p}{\mu}$
 Sc = bilangan Schmidth, $\frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}}$
 Sh = bilangan Sherwood, $\frac{K_{ca} \cdot \rho \cdot D_p^2}{\mu}$
 t = waktu adsorpsi, detik
 u_L = kecepatan superfisial, cm/detik
 Z = jarak dari puncak kolom, cm
 ε = porositas internal partikel
 μ = viskositas larutan fenol, $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{detik}$
 ρ = densitas larutan fenol, g/cm^3
 ρ_s = densitas padatan, g/cm^3

8. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Duri, B., dan McKay, G., 1990, "Comparison in Theory and Application Mathematical Models to Predict Kinetics of Single Component Batch Adsorption Systems", *Trans IChemE*, 68(B), pp.254 - 268.
 Brusseau, M.L. and Rao, P.S.C., 1989, "Sorption Nonideality During Organic Contaminant Transport in Porous Media", *Critical Review in Environmental Control*, Vol. 19, Issue I.
 Chatzopoulos, D., Varma, A., and Irvine, R.L., 1994, "Adsorption and Desorption Studies in The Aqueous Phase for the Toluene/Activated Carbon System", *Environ. Prog.*, 13, 26.
 Chang, B.V., 1994, "Biodegradation of Phenol in the Sediment", National Science Council Report, NSC-83-0421-P-031-003-Z, NSC., Taiwan.

- Coony, D. O dan Xi, L., 1994, "Activated Carbon Catalyzes Reactions of Phenolics During - Liquid - Phase Adsorption", *Environmental and Energy Engineering*, 40 (2), 361- 364.
- Cooney, D.O. and Xi, Z., 1994, "Activated Carbon Catalyzes Reactions of Phenolics During Liquid - Phase Adsorption", *AIChE Journal*, Vol. 40, No.2, pp. 361-364.
- Dolgova, L.G. and Kuchma, V.N., 1981, "The Ability of The Soil to Decompose Phenol Under Industrial Pollution Conditions", *Decomposition of Toxic and Nontoxic Organic Compound in Soils*, pp. 169-174, Edited by Overcash, H.R., Ann Arbor Science Publishers Inc., The Butterworth Group, England.
- Dolgova, L.G. and Kuchma, V.N., "The Ability of the Soil to Decompose Phenol under Industrial Pollution Conditions, in *Decomposition of Toxic and Nontoxic Organic Compounds in Soils*", Overcash, M.R. (ed), 1981, Ann Arbor Science, 1981.
- Fang, H.H., Chen, T., Li, Y. and Chui, H.K., 1996, "Degradation of Phenol in Wastewater in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor", *Wat.Res.*, 30(6), pp. 1353-1360.
- Giusti, D. U., Conway, R.A., and Lawson, C.T., 1974, "Activated Carbon Adsorption of Petrochemicals", *Chem. Eng.*, 46, 947.
- Graham, J.R. and Ramaratnam, M, 1993, "Recover VOCs Using Activated Carbon", *Chem. Eng.*, 45 (3), 58.
- Greenberg, A.E., Trussel, R.R., and Clesceri, L.S., 1985, "Standard Methodes for the Examination of Water and Waste Water", 16th ed., pp. 560-561, American Public Health Association, Washington
- Hadiyanto, A., 1994, "Perpindahan Massa pada Adsorpsi Asam Asetat dalam Kolom Isian Arang Aktif", Tesis yang diajukan kepada Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Herkomoyo, S., 1996, "Koefisien Perpindahan Massa dan Koefisien Difusi Efektif Aksial pada Proses Pertukaran Kation Ca^{++} dengan Resin dalam Kolom Berunggun Diam", Tesis yang diajukan kepada Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Jacobsen, B.N. and Arvin, E., 1996, "Biodegradation Kinetics and Fate Modelling of Pentachlorophenol in Bioaugmented Activated Sludge Reactor", *Wat.Res.*, 30(5), pp. 1184-1194.
- Jacobsen, B.N., Arvin, E. and Reinders, M., "Factor Affecting Sorption of Pentachlorophenol to Suspended Microbial Biomass", *Wat. Res.*, 30(1), pp. 13-20.
- Lampi, P., Vartiainen, T., and Tuomisto, J., 1990, "Population Exposure to Chlorophenols, Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans After a Prolonged Ground Water Pollution by Chlorophenols", *Chemosphere*, Vol. 20, pp.625-634.
- Lin, S.H. and Hsu, F.M., 1995, "Liquid -Phase Adsorption of Organic Compounds by Granular Activated carbon and Activated Carbon Fibers", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, pp. 2110-2116

- McKay, G. and Bino, M.J., 1990, "Fixed Bed Adsorption for the Removal of Pollutans from Water", *Environ. Pollut.*, 66, 32.
- Mulyaningsih, M.F.S., 1996, "Koefisien Perpindahan Massa dan Koefisien Difusivitas Efektif Aksial pada Dekolorisasi Minyak Kelapa dalam Kolom Isian Karbon Aktif", Tesis yang diajukan kepada Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Noll, K.E., Gournaris, V., and Hou, W.S., 1992, "Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control", Lewis Publisher, Chelsea, MI.
- Schweitzer, P.A., 1979, "Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineering", pp. 1-416 - 1-421, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
- Sorial, G.A., Suidan, M.T., Vidic, R.D., and Brenner, R.C., 1994, "Effect of GAC Characteristics on Adsorption of Organic Pollutans", *Environ. Prog.*, 13, 53.
- Stenzel, M.H., 1993, "Remove Organics by Activated Carbon", *Chem. Eng. Prog.*, 89 (4), 36.
- Treybal, R.E., 1981, "Mass Transfer Operations", 3rd ed., pp. 565-567, 602-604, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo.
- Warsito, E., 1996, "Koefisien Perpindahan Massa Adsorpsi Para Xilen pada Kolom Terisi Bentonit", Tesis yang diajukan kepada Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.
- Welty, J.R., Wilson, R.E. and Wicks, C.E., 1976, "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 2nd edition, pp. 479-480, Wiley International Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Xie, T.M., Abrahamsson, K., Fogelqvist, E. and Josefsson, B., 1986, "Distribution of Chlorophenolics in a Marine Environment", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. 457-463.
- Ying, W.C., and Woehr, G.C., 1990, "Adsorption Capacities of Activated Carbon for Organic Constituents of Wastewater", *Environ. Prog.*, 9, 120.